

Caracterização de Areias Carbonáticas do Litoral Cearense

Diana Rodrigues de Lima Gonçalves

Doutoranda, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, Brasil, diana.lima@ufca.edu.br

Dalila Almeida do Nascimento

Engenheira civil, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, Brasil, dalila.almeida.mk@gmail.com

Victor Luiz da Silva Alves,

Mestrando, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, Brasil, victorluizalves@alu.ufc.br

Jorge Fiori Fernandes Sobreira

Geofísico Sênior, CENPES, Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil, fiori@petrobras.com.br

Alfran Sampaio Moura

Professor, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, Brasil, alfransampaio@ufc.br

RESUMO: Solos carbonáticos (ou solos calcários) diferem dos solos siliciclásticos em vários aspectos, como no processo de formação, na mineralogia, na estrutura e no comportamento. Esse último está relacionado às propriedades físicas e mecânicas desses sedimentos que possuem em sua composição o carbonato de cálcio (CaCO_3). Em zonas costeiras, esse carbonato é geralmente proveniente da deposição de conchas marinhas, fragmentos de corais, algas calcárias e outros organismos marinhos. As propriedades físicas e mecânicas desses materiais podem ser bastante variáveis de região para região, mesmo para curtas distâncias. Neste estudo, foram avaliadas propriedades físicas como granulometria, densidade, umidade higroscópica e índice de vazios de amostras de areia da faixa litorânea cearense, a partir de ensaios de laboratório. Verificou-se que a presença de conchas e sedimentos marinhos (algas calcáreas e esqueletos de animais marinhos) compõem a fração mais grossa desse tipo de areia. A maioria significativa das amostras apresenta uma umidade higroscópica muito baixa e as amostras com menor teor de carbonato apresentaram maior teor de finos. A densidade dos grãos e o índice de vazios máximo apresentaram expressiva variabilidade espacial.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedades físicas, teor de carbonato, areias calcárias.

ABSTRACT: Calcareous soils (or limestone soils) differ from siliciclastic soils in several aspects, such as in the formation process, mineralogy, structure, and behavior. The latter is related to the physical and mechanical properties of these sediments that contain calcium carbonate (CaCO_3) in their composition. In coastal zones, this carbonate is usually derived from the deposition of marine shells, coral fragments, calcareous algae, and other marine organisms. The physical and mechanical properties of these materials can vary significantly from region to region, even over short distances. In this study, physical properties such as particle size distribution, density, hygroscopic moisture, and void ratio of sand samples from the coastal strip of Ceará were evaluated through laboratory tests. It was found that the presence of shells and marine sediments (calcareous algae and marine animal skeletons) constitutes the coarser fraction of this type of sand. A significant majority of the samples exhibit very low hygroscopic moisture, and samples with lower carbonate content showed higher fines content. Grain density and maximum void ratio showed significant spatial variability.

KEYWORDS: Physical properties, carbonate content, calcareous sands.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Claudino-Sales (2016), a zona litorânea corresponde à área de ação direta das ondas, das marés e dos ventos, sendo principalmente constituída de praias, falésias ativas e inativas, dunas frontais,

lagoas costeiras, barreiras e flechas litorâneas. As pontas litorâneas, as desembocaduras fluviais e os cordões de beach-rocks criam diversificação e rupturas na extensão da área. A faixa litorânea cearense situa-se sobre a Formação Jandaíra, que corresponde a uma seqüência de sedimentação carbonática, caracterizada pela predominância de carbonatos marinhos, de águas rasas e agitadas, tanto em superfície como em subsuperfície (Tibana e Terra, 1981).

Existem diferenças importantes de propriedades físico-mecânicas relacionadas à composição mineralógica e às variações faciológicas presentes nas camadas calcárias da Formação Jandaíra. Assim, são pertinentes estudos relacionados ao comportamento físicomecânico e composicional das solos sedimentares da região, uma vez que o litoral cearense, em função de seu alto potencial para geração de energia limpa e renovável, tem sido alvo de grandes investimentos em parques eólicos, como aponta o relatório apresentado pelo IBAMA (2024). Com isso, surge o desafio de otimizar os projetos de fundações dessas estruturas, a partir da conhecimento das características físicas e comportamentais do solos que predominam nessa faixa litorânea, como as areias carbonáticas, caracterizadas por depósitos sedimentares compostos principalmente de grãos de areia e partículas de carbonato de cálcio (geralmente na forma de calcita ou dolomita), podendo ser encontradas próximo a recifes de coral, plataformas continentais rasas e lagunas. Nesse contexto, a presente pesquisa investiga as características físicas e mecânicas de três amostras de areias do litoral cearense com diferentes teores de carbonato de cálcio (CaCO_3), a partir de ensaios de laboratório, com o objetivo de contribuir para a base de dados referente aos solos carbonáticos da região supracitada.

Segundo Kuang et. al (2020), as areias carbonáticas podem ser encontradas em áreas tropicais ou subtropicais em todo o mundo e é composta principalmente por restos de corais e caracóis. Cataño (2006) realizou ensaios com areias carbonáticas e mostrou que as areias carbonáticas apresentam mais volume de vazios em relação ao volume de sólidos do que areias típicas (quartzosas). Le Tirant e Nauroy (1994) destacam que nas areias carbonáticas, os grãos individuais são extremamente angulares e fracos. Essas características associadas à porosidade, tornam esses solos altamente compressíveis. As propriedades físicas e mecânicas podem ser bastante variáveis de região para região, mesmo para curtas distâncias, como mostra o estudo de alguns índices físicos obtidos em amostras de areias carbonáticas oriundas de diferentes localidades, apresentada por Salém et al. (2013).

Em solos tropicais, a porosidade interagregado é um aspecto relevante que deve ser considerado na análise do comportamento mecânico do solo e, portanto, é essencial o conhecimento da estrutura das areias carbonáticas quando da determinação dos parâmetros a serem utilizados como dados de entrada para as análises que consistem em um projeto de fundações para estruturas assentes nesse tipo de solo. Nascimento (2023 concluiu, a partir de um estudo para avaliação dos parâmetros de resistência de areias litoclásticas ($\% \text{CaCO}_3 < 30\%$) do litoral do cearense, que a concentração de CaCO_3 influencia os parâmetros de resistência internos do solo, bem como os parâmetros de resistência da interface solo-concreto.

Convém ressaltar que o presente trabalho é parte de uma investigação ampla que contempla o estudo do comportamento estático e dinâmico de solos carbonáticas provenientes de diversas áreas do litoral nordestino, a partir de ensaios de campo e de laboratório e portanto, os resultados apresentados aqui são preliminares.

2 ÁREAS DE ESTUDO

Foram selecionadas duas praias cearenses para o desenvolvimento do estudo: Praia da Barra do Ceará, em Fortaleza e a Praia de Moitas, em Amontada. A praia da Barra do Ceará é caracterizada por uma faixa pouco espessa de areia litoclástica sobrejacente um depósito de arenito rígido com cimento carbonático e a zona entre-marés apresenta extensos afloramentos de beach-rocks. A areia depositada entre os beachrocks têm grande quantidade de conchas, restos de esqueletos de animais marinhos e algas. A Foz do Rio Aracatiaçu, por sua vez, localiza-se a aproximadamente 230 km de Fortaleza, já oeste da Praia de Moitas. Nas margens do Rio há um banco de areia carbonática pedregulhosa, com presença de rodolitos e algas coralíneas. É possível encontrar ainda pedaços de arenitos cimentados por algas do tipo halimedes. Nas Figura 1 e Figura 2 estão apresentados os registros fotográficos dos sedimentos e/ou afloramentos encontrados na Praia da Barra do Ceará e na Foz do Rio Aracatiaçu, respectivamente.



Figura 1. Elementos da Praia da Barra do Ceará. (a) Areia litoclástica sobrejacente aos aretidos rígidos, (b) Areia com conchas, esqueletos e algas entre os beach-rocks, (c) detalhe da camada heterogênea do beach-rock e (d) depósito calcário muito cimentado.



Figura 2. Sedimentos encontrados na Foz do Rio Aracatiçu. (a) Areia carbonática com presença de rodolitos. (b) Alga calcária, (c) e (d) Pedacos de arenitos cimentados por carbonato e (e) Farinha de halimeda.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida com base nas seguintes etapas: revisão bibliográfica; coleta de amostras, ensaios de laboratório e análises de resultados. Foram coletadas 2 amostras (BC e FOZ) na condição onshore, ao longo da zona entre-marés das áreas de estudo, e 1 amostra (PCO) na condição offshore, a 7m de profundidade em relação ao nível do mar, já na Plataforma Continental Cearense, cujo acesso se deu por barco a partir da praia de Moitas. Na Figura 3 identifica-se a localização das áreas de estudo (em vermelho), e destaca-se os pontos de coleta (em amarelo).



Figura 3. Localização das áreas de estudo, com detalhamentos dos pontos de coleta.

As amostras foram submetidas aos ensaios de caracterização física e química (análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, determinação da massa específica dos grãos, determinação dos limites de liquidez e de plasticidade, determinação do índice de vazios máximo e mínimo, e determinação do teor de carbonato), ensaios de caracterização mineralógica (fluorescência de raio-x e análise mineralógica com lupa) e ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova medindo 50mm x 50mm no estado fofo, sob tensões normais 50 kPa (0,5 kg/cm²); 100 kPa (1,0 kg/cm²); e 200 kPa (2,0 kg/cm²), conforme norma internacional ASTM.

Nos ensaios de cisalhamento direto as amostras foram saturadas com água destilada e as cargas foram aplicadas em um único estágio. Após a estabilização das deformações sob o carregamento, precedeu-se a fase de cisalhamento sob velocidade constante de 0,1 mm/min. Os ensaios de caracterização física foram realizados segundo às normativas técnicas nacionalmente padronizadas pela ABNT. Na determinação do teor de carbonato utilizou-se método do calcímetro de Bernad. Os ensaios de fluorescência de raio X em amostras de areia foram realizados no equipamento para FRX marca PANALYTICAL modelo Epsilon 1. Nas análise mineralógicas foi utilizada a Lupa Binocular Eletrônica Nikon 5218. Os resultados foram analisados e organizados por grupos de ensaio, com objetivo de descrever as características de cada amostra.

4 RESULTADOS

As curvas granulométricas obtidas estão apresentadas na Figura 4. Na Tabela 1 apresenta-se um resumo da caracterização física, os parâmetros obtidos e a classificação de acordo com o SUCS para as amostras ensaiadas. Nota-se que as amostras mais carbonatadas são aquelas que apresentam grãos maiores, maior umidade higroscópica e maior intervalo do índice de vazios. A maior quantidade de pedregulhos nas amostras FOZ e PCO está associada à grande quantidade de rodolitos presentes nessas amostras. As amostras BC, FOZ e PCO foram classificadas em areia malgraduada, areia bem-graduada com pedregulhos e areia bem-graduada com silte e pedregulhos, respectivamente.

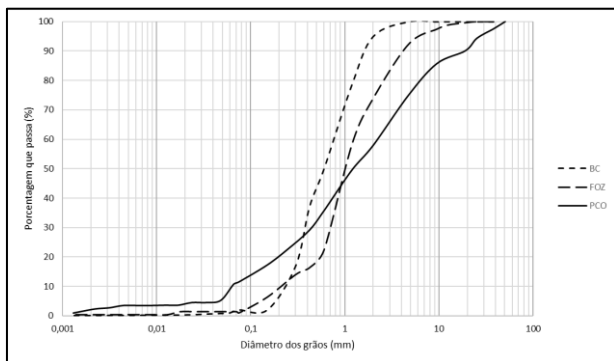


Figura 4. Curvas granulométricas

Tabela 1. Caracterização física

Amostra	BC	FOZ	PCO
Teor de carbonato de cálcio (%)	9,2	49,8	89,8
Pedregulho	5	26	42
Areia grossa	45	52	22
Composição textural (%)			
Areia média	42	14	16
Areia fina	7	6	15
Silte	1	1	3
Argila	0	1	2
Umidade higroscópica (%)	0,14	0,19	0,98
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,660	2,657	2,690
Índice de vazios mínimo	0,40	0,53	0,60
Índice de vazios máximo	0,59	0,73	0,89
Índice de Plasticidade	0	0	0
Classificação (SUCS)	SP	SW	SW-SM

A partir dos ensaios de fluorescência de raio-x foi possível determinar a composição química elementar das amostras e identificar os elementos presentes e suas concentrações, bem como determinar teor dos óxidos presentes nas amostras. Tal identificação pode ajudar na identificação dos minerais presentes no solo e no entendimento do seu comportamento, uma vez que a presença de óxidos de cálcio e magnésio pode indicar a presença de carbonatos que afetam a capacidade de troca iônica do solo e sua suscetibilidade à dilatação e/ou contração. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Identificou-se, de diferentes formas, a presença dos carbonatos nas amostras, sendo a amostra PCO, coletada na condição offshore, a que obteve quantidade mais expressiva de cálcio e óxido de cálcio, e conseqüentemente, maior teor de carbonato. Ambas as amostras apresentam a sílica (típica das areias) e o carbonato de cálcio como principais componentes, sendo que quanto maior é o teor carbonato, menor é a

quantidade de sílica. Além desses, os óxidos de alumínio e ferro foram encontrados nas três amostras e podem estar associadas à formação sedimentar dos materiais estudados.

Tabela 2. Composição química elementar (em %)




Elemento		BC	FOZ	PCO
Alumínio	Al	4,6	5,2	3,4
Bromo	Br	2,2	-	-
Cálcio	Ca	11,8	28,3	53,4
Cloro	Cl	2,6	-	-
Ferro	Fe	0,8	1,6	3,0
Fósforo	P	0,5	-	-
Magnésio	Mg	-	7,3	2,7
Molibidênio	Mo	-	-	1,0
Potássio	K	6,2	4,9	3,1
Silício	Si	73,3	52,4	33,0
Titânio	Ti	-	0,3	0,5

Tabela 3. Composição de óxidos (%)

Óxidos	BC	FOZ	PCO
Al ₂ O ₃	2,8	6,3	4,6
As ₂ O ₃	1,1	-	-
CaO	5,5	16,6	38,9
Fe ₂ O ₃	0,3	0,8	1,9
K ₂ O	2,7	-	2,1
MgO	-	8,6	3,3
MoO ₃	-	-	0,9
P ₂ O ₅	0,5	-	-
Rb ₂ O	5,2	-	-
SeO ₂	0,3	-	-
SiO ₂	72,0	64,9	47,9
SO ₃	0,2	-	-
SrO	1,8	-	-
Ta ₂ O ₅	1,0	-	-
TiO ₂	-	0,2	0,4

Na análise mineralógica com a lupa binocular eletrônica foi possível observar minerais em detalhes, facilitando a identificação de suas propriedades ópticas, estrutura cristalina, clivagem, cor, brilho e outras características que são úteis na identificação mineralógica. As principais características identificadas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização mineralógica

Amostra	BC	FOZ	PCO
Ambiente	Praia onshore	Foz de Rio	Praia Offshore
Grau de seleção	Mal selecionado	Baixo selecionado	Moderado a baixo selecionado
Arredondamento	Anguloso	Subanguloso	Subarredondado
Mineralogia	Quartzo, feldspatos, fragmento de rocha e bioclastos	Mica, fragmentos de rocha, bioclastos, quartzo e conchas	Fragmentos de rocha, quartzo, conchas e bioclastos
Brilho	Grãos brilhosos	Grãos brilhosos	Grãos foscos
Esfericidade	Baixa	Baixa	Intermediária
Designação	Areia litobioclástica com grânulos	Areia litobioclástica	Areia litobioclástica
Fotografia			

É importante observar a presença de bioclásticos, que são fragmentos ou restos de organismos que foram incorporados às areias durante o processo de deposição. Esses organismos podem ser conchas, esqueletos, carapaças, fragmentos de plantas, entre outros materiais orgânicos. Quanto à forma dos grãos caracterizada a partir da avaliação do arredondamento e da esfericidade, pode-se afirmar que esta característica tem influência direta no comportamento mecânico do material. As amostras BC e FOZ possuem grãos com angulares e têm baixa esfericidade, o que pode contribuir para ângulos de atrito mais elevados e portanto, maior resistência ao cisalhamento.

Para avaliar os parâmetros de resistência das amostras no estado fofo, ou seja, com o índice de vazios em torno do máximo, foram realizados os ensaios de cisalhamento direto. As curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal podem ser observados na Figura 5.

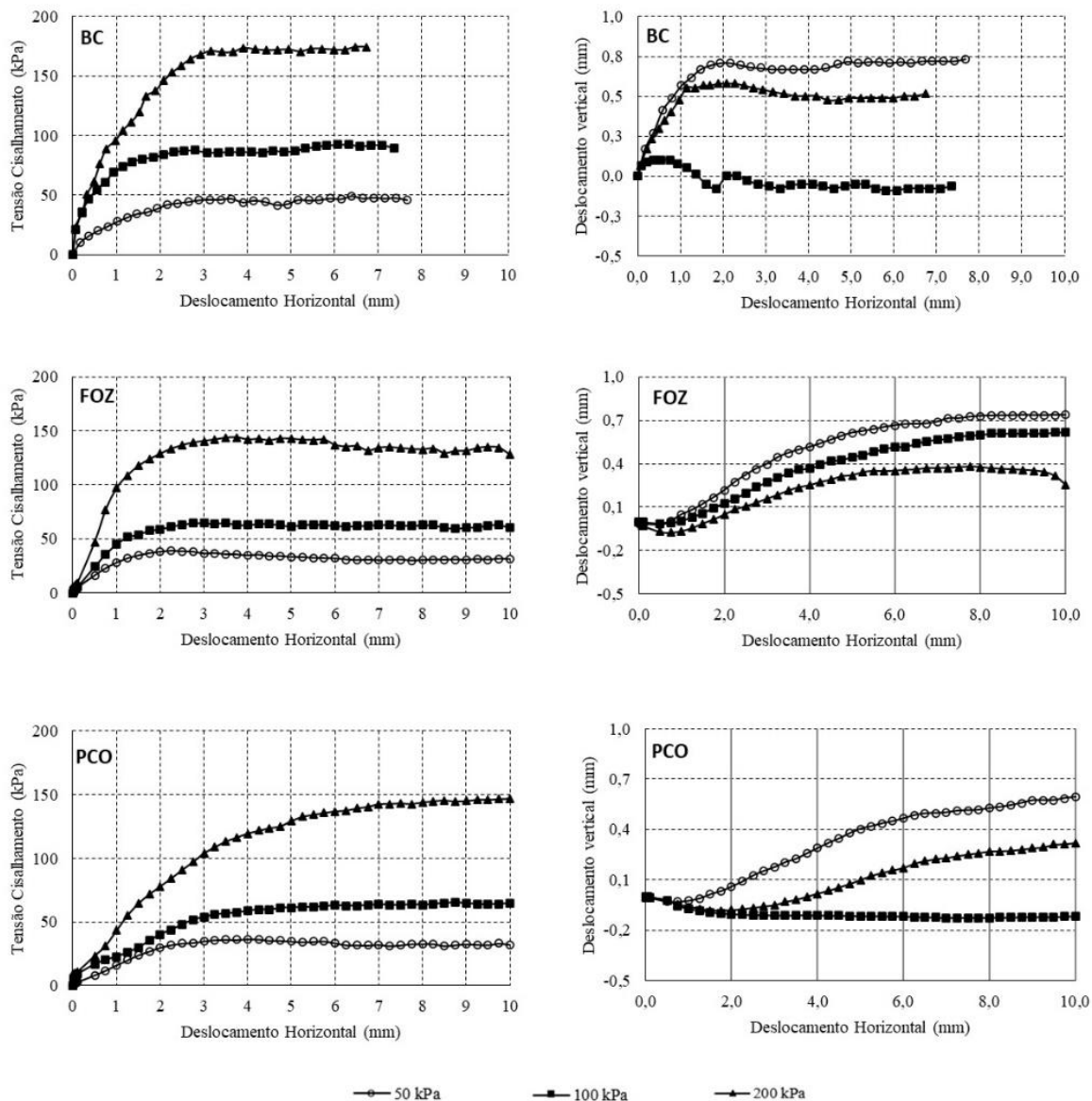


Figura 5. Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal

As curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal apresentaram comportamento de resistência residual, conforme esperado. Durante o cisalhamento, a amostra BC, com menor teor de carbonato, apresentou comportamento inicialmente expansivo, comprimindo-se em seguida até estabilização. Tal comportamento foi mais acentuado para a tensão intermediária de 100kPa. Já as amostras FOZ e PCO, com teor de carbonato mais elevado, apresentaram comportamento inicialmente compressivo e posteriormente expansivo para

praticamente todas as tensões, exceto para a tensão de 100 kPa, em que a amostra PCO apenas contraiu durante do cisalhamento. Tal comportamento pode estar associado à heterogeneidade do material devido à maior presença de bioclastos.

A partir dos valores obtidos para as tensões cisalhantes máximas construiu-se os gráficos de tensão de cisalhamento x tensão normal que correspondem às envoltórias de ruptura apresentadas na Figura 6. Os valores obtidos para o ângulo de atrito interno do solo, estão apresentados na Tabela 5.

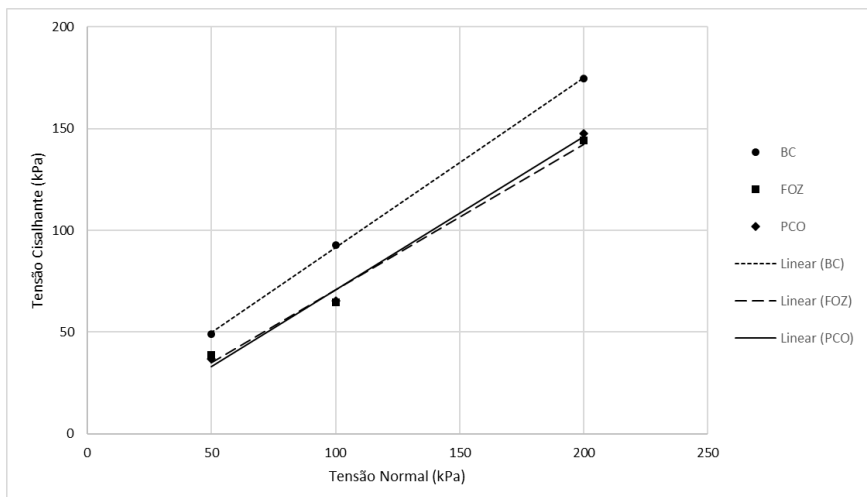


Figura 6. Envoltórias de ruptura

Tabela 5 - Valores obtidos para o ângulo de atrito interno

Amostra	Ângulo de atrito - ϕ
BC	42°
FOZ	35°
PCO	37°

A amostra com menor teor de carbonato apresentou ângulo de atrito interno mais elevado, o que não é uma tendência de acordo com a literatura. Entre as amostras mais carbonatadas, aquela com maior teor de carbonato, obteve maior ângulo de atrito interno.

5 CONCLUSÕES

A partir da caracterização física e mineralógica pode-se afirmar que as amostras BC, FOZ e PCO são classificadas como areia malgraduada, areia bem-graduada com pedregulhos e areia bem-graduada com silte e pedregulhos, respectivamente. A amostra com maior percentual pedregulhoso, associado a rodolitos, foi encontrado na amostra PCO, coletada offshore. As areias coletadas no litoral cearense e na plataforma continental (em águas rasas), apresentam carbonato em sua composição, sendo as amostras FOZ E PCO aquelas com maior teor de carbonato de cálcio. Em todas as amostras o carbonato de cálcio está associado à presença de bioclastos como fragmentos de animais (ossos e conchas) e de algas calcárias (halimeda e coralínea). Amostras com teor de carbonato intermediário e elevado tendem a se contrair e depois dilatar, durante o processo de cisalhamento. Neste estudo a amostra com menor teor de carbonato apresentou-se mais resistente. No entanto, entre as amostras mais carbonatadas, quanto maior o teor de carbonato, maior é a resistência apresentada pelo material, quando submetida ao ensaio de cisalhamento direto no estado fofo. Com isso, fica ressaltada a importância de um estudo específico para descrever as características dos solos carbonáticos, a fim de desenvolver modelos geotécnicos mais realistas, que possam ser aplicados em projetos de fundações nas regiões litorâneas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à PETROBRAS, pelo apoio financeiro; à Universidade de Brasília pelo apoio acadêmico; ao Departamento de Pós-graduação DEHA e ao Departamento de Geologia, ambos da Universidade Federal do Ceará (UFC), pelo suporte estrutural da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura de 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABNT. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. NBR 16840: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ABNT. NBR 16843: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ABNT. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 3 p.
- ABNT. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 5 p.
- ASTM. ASTM D3080/D3080M – 11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken: ASTM, 2011. 9 p. Disponível em: <https://www.astm.org/d3080-04.html>. Acesso em: 14 out. 2023.
- Cataño, Arango J. (2006) Stress strain behavior and dynamic properties of Cabo Rojo calcareous sands. Dissertação de Mestrado / Universidade de Porto Rico, Mayagüez Campus, 250p.
- Claudino-Sales, Vanda. (2016). Megageomorfologia do Estado do Ceara. 1. ed. São Paulo: Novas Edições Acadêmicas, v. 1. 90p.
- Nascimento, D. A. (2023). Estudo da resistência da interface solo-concreto de areias carbonáticas do litoral cearense. Monografia / Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, 52p.
- IBAMA (2024). Usinas Eólicas Offshore. Disponível em: <www.gov.br/ibama> Acessado em: 22 fev. 2024.
- Kuang, D., Long, Z., Wang, J. Zhou, X. Yu, P. (2020). Experimental study on particle size effect on mechanical behaviour of dense calcareous sand. *Soils and Rocks* 43(4): 567-574.
- Le Tirant, P, And Nauroy, J F. (1994) Foundations in carbonate soils. Éditions Technip. Paris, France, 204p.
- Salem, M.; Elmamlouk, H.; Agaiby, S. (2013). Static and cyclic behavior of North Coast calcareous sand in Egypt. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 55 (2013): 83–91.
- Tibana, P. & Terra, G.J.S. (1981). Sequências carbonáticas do Cretáceo na Bacia Potiguar. *Boletim Técnico da Petrobrás*, 24, p.174-183.